

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, к. т. н. А. В. ТРОЯНСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: anjand@mail.ru, kuuk@mail.ru

## АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ТРЕБУЕМОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ И ЦЕЛОЧИСЛЕННЫМИ АМПЛИТУДНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

*Предложен алгоритм синтеза эквидистантных линейных решеток с действительными амплитудными коэффициентами и ограниченным набором фазовых коэффициентов, а также модификация данного алгоритма для случая целочисленных значений затухания аттенюаторов антенной решетки. В основе алгоритма лежит дискретное Фурье-преобразование функции, описывающей требуемую диаграмму направленности решетки.*

**Ключевые слова:** диаграмма направленности, дискретное преобразование Фурье, фазированная антенная решетка, управляемые аттенюаторы, фазовращатели.

Резкий скачок в развитии малогабаритных систем связи с подвижными объектами привел к ужесточению требований к массогабаритным и техническим показателям антенных устройств. Реализация заданной функции направленности антенн при сохранении высокого коэффициента направленного действия совместно с задачей их миниатюризации и технологичности представляет собой довольно сложную проблему как в теоретическом, так и в практическом плане [1].

Основной проблемой синтеза антенных решеток (АР) по требуемой диаграмме направленности (ДН) является комплексное представление амплитудно-фазового распределения поля вдоль решетки, которое приводит к сложности технической реализации аттенюаторов и фазовращателей. Целью настоящей работы является разработка алгоритма синтеза антенной решетки с дискретными элементами при аппроксимации комплексного амплитудно-фазового распределения поля вещественным.

Синтез АР по заданной функции направленности в общем случае сводится к нахождению массива амплитудных и фазовых коэффициентов [2, 3]. При этом точность аппроксимации диаграммы направленности существенно зависит от длины решетки или от числа облучателей в заданной плоскости.

Типовая структурная схема АР приведена на рис. 1. Схема содержит набор постоянных калиброванных аттенюаторов  $A_1 \dots A_n$  и фазовращателей  $\Phi_1 \dots \Phi_n$ , которые коммутируются при помощи многопозиционного переключателя.

В зависимости от требований к скорости перестройки ДН и точности ее формирования аттенюаторы с электронным управлением могут быть реализованы в одном из двух вариантов:

— с непрерывной регулировкой, когда используется сопротивление  $p-n$ -перехода СВЧ-транзистора либо диода, которое зависит от напряжения смещения;

— с дискретной регулировкой, когда используются отрезки линии передачи с калиброванным затуханием, а требуемое значение затухания получается при соответствующей коммутации этих отрезков при помощи выключателей на основе  $p-i-n$ -диодов [5, с. 26].

Фазовращатели, как и аттенюаторы, также бывают с плавной зависимостью фазового сдвига от управляющего напряжения (выполняются с применением ферритов) и дискретные, с заранее калиброванными параметрами. При этом следует отметить, что температурные параметры и временная стабильность дискретных аттенюаторов и фазовращателей лучше, чем элементов с плавной характеристикой.

Синтез антенной решетки в зависимости от заданной диаграммы направленности реализуется блоком управления ДН. Известно, что ам-

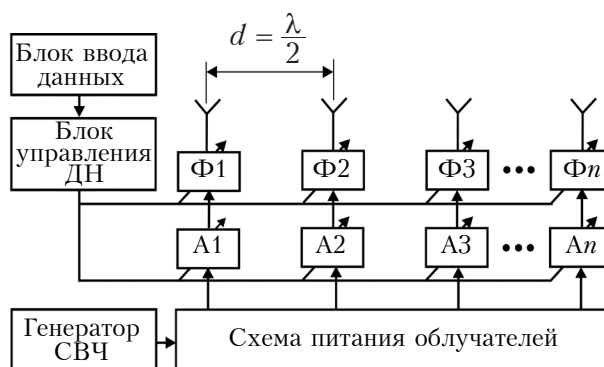


Рис. 1. Структурная схема линейной антенной решетки [4, с. 88]

плитудное распределение поля в раскрыве антенной решетки и диаграмма направленности связаны преобразованием Фурье. То есть амплитудные и фазовые коэффициенты вычисляются с помощью преобразования Фурье, а затем обрабатываются в зависимости от выбранной схемной реализации аттенюаторов и фазовращателей. Вычисление обратного преобразования Фурье для модифицированных коэффициентов позволяет вычислить синтезированную функцию направленности.

При разработке алгоритма поиска амплитудных и фазовых коэффициентов необходимо учесть тот факт, что целочисленные значения затухания технически легче реализовать, чем дробные.

Исходные данные для проведения синтеза решетки — рабочая частота  $f$ , дискретная либо непрерывная функция направленности  $F(\Theta_i)$ ,  $i = 0, N-1$ , допустимая величина среднеквадратического отклонения  $\varepsilon$ .

Алгоритм синтеза эквидистантной линейной решетки с шагом расположения излучателей, равным  $\lambda/2$  (где  $\lambda$  — рабочая длина волны), имеет следующий вид.

Шаг 1. Определяем число излучателей решетки:  $N = \text{Int}(90^\circ / \Delta\varphi)$ , где  $\Delta\varphi$  — фазовый сдвиг между полями излучателей.

Шаг 2. Если функция  $F(\Theta)$  задана в непрерывной форме, разбиваем ее на  $N$  отсчетов.

Шаг 3. Находим прямое дискретное преобразование Фурье  $F(\Theta)$ :

$$C(k) = \sum_{i=0}^{N-1} F(\Theta_i) \exp\left(-j \frac{2\pi i k}{N}\right), k = \overline{0, N-1}.$$

Шаг 4. Находим амплитудные коэффициенты по формуле

$$A(k) = \sqrt{\text{Re}\{C(k)\}^2 + \text{Im}\{C(k)\}^2}.$$

Шаг 5. Округляем амплитудные коэффициенты до ближайшего целого числа:

$$A'(k) = \text{Int}[A(k)].$$

Шаг 6. Присваиваем всем четным фазовым коэффициентам фазу, равную  $\pi$  радиан:

$$B(2i) = \pi, i = \overline{0, (N-1)/2} \text{ или } i = \overline{1, N/2}.$$

Шаг 7. Присваиваем всем нечетным фазовым коэффициентам фазу, равную 0 радиан:

$$B(2i+1) = 0, i = \overline{1, (N-1)/2} \text{ или } i = \overline{1, N/2}.$$

Шаг 8. Находим модифицированные коэффициенты Фурье:

$$C(k) = \text{Re}[A(k) \cdot \exp(j \cdot B(k))] + j \cdot \text{Im}[A(k) \cdot \exp(j \cdot B(k))].$$

Шаг 9. Вычисляем обратное дискретное преобразование Фурье:

$$F'(\Theta_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C(k) \exp\left(j \frac{2\pi i k}{N}\right), i = \overline{0, N-1}.$$

Шаг 10. Вычисляем среднеквадратическое отклонение между  $F(\Theta)$  и  $F'(\Theta)$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (F(\Theta_i) - F'(\Theta_i))^2}{\sum_{i=0}^{N-1} F^2(\Theta_i)}}$$

Шаг 11. Выполняем проверку  $\delta \leq \varepsilon$ : если да, то синтез закончен; если нет, то увеличиваем число излучателей  $N = N+1$  и переходим к шагу 2.

Рассмотрим конкретный пример.

Пусть требуется синтезировать печатную антенную решетку с функцией направленности вида

$$F(\Theta) = \begin{cases} 1 & \text{при } -4^\circ < \Theta < 4^\circ; \\ 0 & \text{при } |\Theta| > 4^\circ \end{cases}$$

при фазовом сдвиге  $\Delta\varphi = 1^\circ$ .

Определим число излучателей решетки:  $N = \text{Int}(90^\circ / \Delta\varphi) = 90$ . Поскольку функция  $F(\Theta)$  задана в непрерывной форме, произведем ее разбиение на 90 отсчетов. После выполнения шагов 3, 4 и 5 приведенного выше алгоритма получим амплитудные коэффициенты. Фазовый спектр коэффициентов зададим в соответствии с шагами 6 и 7.

На рис. 2 изображены точные ( $A_{mt}$ ) и округленные ( $A_{mp}$ ) значения полученных амплитудных коэффициентов в зависимости от нормиро-

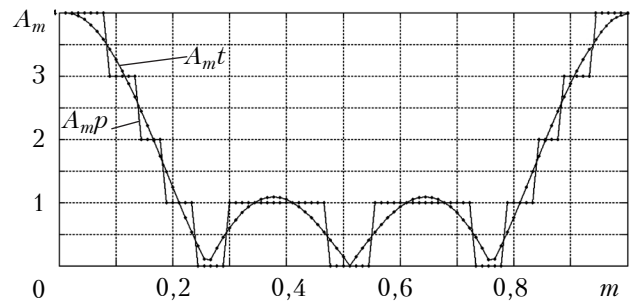


Рис. 2. Точные значения амплитудных коэффициентов ( $A_{mt}$ ) и их значения после округления ( $A_{mp}$ ) в зависимости от нормированной длины антенной решетки  $m$

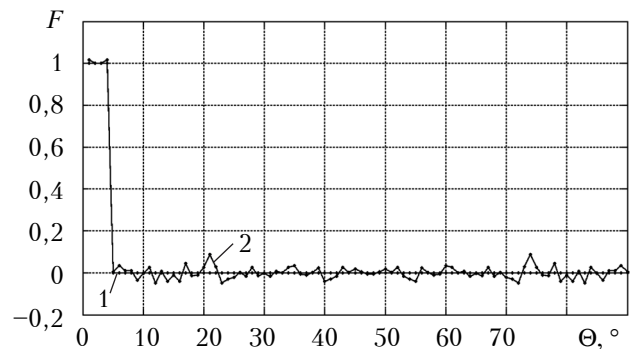


Рис. 3. Заданная (1) и синтезированная (2) диаграммы направленности

ванной длины  $m$  антенной решетки, т. е. приведено амплитудное распределение поля в решетке.

Значение  $m$  вычислялось по формуле

$$m = \frac{l}{N \frac{\lambda}{2}},$$

где  $l$  — фактическая длина решетки.

Результаты, полученные после выполнения обратного дискретного преобразования Фурье, представлены на **рис. 3**.

Анализ рис. 3 показывает достаточно хорошее совпадение заданной и синтезированной диаграмм направленности в районе основного лепестка и возросший уровень боковых лепестков полученной диаграммы, что можно отнести к ее недостаткам. Относительный уровень боковых лепестков в данном случае составляет  $\xi = 20 \lg 0,08 = -21,9$  дБ, а среднеквадратическое отклонение  $\delta = 0,15$ .

### Заключение

Разработанный алгоритм синтеза линейных антенных решеток с целочисленными амплитудными и бинарными фазовыми коэффициентами, который основан на использовании быстрого дискретного преобразования Фурье, позволяет обеспечить заданное среднеквадрати-

ческое отклонение от исходной диаграммы направленности. При этом исходная функция направленности может быть задана как аналитическим выражением, так и в дискретной форме. Предложенный алгоритм также можно с успехом применить для расчета коэффициентов, определяющих диаграмму направленности антенны, что особенно важно в связи с появлением управляемых фазовращателей и аттенуаторов в интегральном исполнении.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зелкин Е. Г., Соколов В. Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием. — Москва: Сов. радио, 1980.
2. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиотехнических приложениях / Под ред. В. Ф. Кравченко. — Москва: Физматлит, 2011.
3. Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф., Гусевский В. И. Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн. — Москва: Сайнс-Пресс, 2005.
4. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Под ред. Д. И. Воскресенского. — Москва: Радио и связь, 2012.
5. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского, А. И. Канащенкова. — Москва: Радиотехника, 2004.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 28.01 2015 г.

А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, О. В. ТРОЯНСКИЙ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: anjand@mail.ru, kuuk@mail.ru

## АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ЛІНІЙНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК З НЕОБХІДНОЮ ДІАГРАМОЮ СПРЯМОВАНOSTІ І ЦІЛОЧИСЛОВИМИ АМПЛІТУДНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ

*Запропоновано алгоритм синтезу еквідистантних лінійних решіток з дійсними амплітудними коефіцієнтами і обмеженим набором фазових коефіцієнтів, а також модифікацію даного алгоритму для випадку цілочислових значень згасання аттенуаторів антенної решітки. В основі алгоритму лежить дискретне Фур'є-перетворення функції, яка описує необхідну діаграму спрямованості решітки.*

**Ключові слова:** діаграма спрямованості, дискретне перетворення Фур'є, фазована антенна решітка, керувані аттенуатори, фазообертачі.

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.15  
UDC 621.396.677.49

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO, A. V. TROYANSKY

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: anjand@mail.ru, kuuk@mail.ru

## ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF LINEAR ANTENNA ARRAYS WITH DESIRED RADIATION PATTERN AND INTEGRAL AMPLITUDE COEFFICIENTS

*The problem of technical implementation of phased array antennas (PAR) with the required radiation pattern (RP) is the complexity of the construction of the beamforming device that consists of a set of controlled attenuators and phase shifters. It is possible to simplify the technical implementation of PAR, if complex representation of coefficients of amplitude-phase distribution of the field along the lattice is approximated by real values in the synthesis stage.*

It is known that the amplitude distribution of the field in the aperture of the antenna array and the radiation pattern are associated with Fourier transform. Thus, the amplitude and phase coefficients are first calculated using the Fourier transform, and then processed according to the selected type of circuit realization of attenuators and phase shifters. The calculation of the inverse Fourier transform of the modified coefficients allows calculating the synthesized orientation function.

This study aims to develop a search algorithm for amplitude and phase coefficients, taking into account the fact that integer-valued amplitudes and phases are technically easier to implement than real ones.

Synthesis algorithm for equidistant linear array with a half-wavelength irradiators pitch ( $\lambda/2$ ) is as follows.

From a given directivity function the discrete Fourier transform (DFT) in the form of an array of complex numbers is found, the resulting array is then transformed into a set of attenuations for attenuators and phase shifts for phase shifters, while the amplitude coefficients are rounded off to integers, and phases are binarized (0,  $\pi$ ).

The practical value of this algorithm is particularly high when using controlled phase shifters and attenuators integrally.

The work confirms the possibility of a thermoelectric converter of human body application for an electronic medical thermometer power supply.

**Keywords:** radiation pattern, the discrete Fourier transform, phased array antenna, controlled attenuators, phase shifters.

## REFERENCES

1. Zelkin E.G., Sokolov V.G. [Methods of synthesis of antennas. Phased arrays and antennas with continuous aperture] *Metody sinteza antenn: Fazirovannye antennnye reshetki i anteny s nepreryvnym raskryvom*. Moscow, Sovetskoe radio, 1980, 296 p. (Rus)
2. *Tsifrovaya obrabotka signalov i izobrazhenii v radiofizicheskikh prilozheniyakh* [Digital signal and image processing applications in radiophysical] Ed. by V. F. Kravchenko, Moscow, Fizmatlit, 2011, 544 p. (Rus)
3. Zelkin E.G., Kravchenko V.F., Gusevskii V.I. [Constructive methods of approximation in the theory of antennas] *Konstruktivnye metody approksimatsii v teorii antenn*, Moscow, Sains-Press, 2005, 512 p. (Rus)
4. *Ustroistva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennnykh reshyotok* [Microwave devices and antennas. The design of phased antenna arrays]. Ed. by D.I. Voskresenskii. Moscow, Radio i svyaz', 2012, 746 p. (Rus)
5. *Aktivnye fazirovannye antennnye reshetki* [Active phased arrays]. Ed. by D.I. Voskresenskii, A.I. Kanashchenkov, Moscow, Radiotekhnika, 2004, 488 p. (Rus)

## НОВЫЕ КНИГИ

## НОВЫЕ КНИГИ

**Ащеулов А. А., Охрем В. Г., Романюк И. С. Новые термоэлектрические эффекты и элементы (на украинском языке).— Черновцы: Издательский дом «Родовід», 2015.**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований некоторых новых физических явлений и эффектов в термоэлектрически неоднородных и анизотропных средах. К ним относятся такие как Umkehr-эффект, а также явления объемной термо-эдс и Бриджмена. Их использование позволило предложить и создать ряд оригинальных холодильных элементов. Рассмотрены также новые аспекты явления вихревых термоэлектрических токов, позволившие предложить оригинальный подход к проблеме термоэлектрического преобразования энергии. Полученные результаты обусловили появление ряда перспективных генераторных и холодильных элементов.

Для ученых, занимающихся термоэлектричеством, инженеров-разработчиков термоэлектрических приборов, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

